

УДК 524.7

Исследования в области астрофизики сверхвысоких энергий ($>10^{12}$ эВ)

В.П.Фомин, А.А.Степанян, Ю.И. Неупор

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 11 апреля 2006

Ключевые слова: Гамма-астрономия, космические лучи, черенковское излучение.

Астрономия является достаточно консервативной наукой, и развитие её новых направлений шло не всегда быстро. Так произошло с радиоастрономией, так как было поначалу принято, что большинство звёзд не являются радиоисточниками. Лишь в последствии радиоастрономия была признана как очень важное направление в астрономии. То же самое происходило и с наземной гамма-астрономией. Только после впечатляющих результатов спутниковых измерений в энергетической области $E_\gamma > 100$ МэВ (эксперименты SAS-2, COS-B) было обращено внимание на наземную гамма-астрономию сверхвысоких энергий. Дело в том, что при энергиях $E_\gamma > 50$ ГэВ эффективность спутниковых измерений становится чрезвычайно низкой из-за слишком малых ожидаемых потоков гамма-квантов.

В КрАО начало исследований в области астрофизики высоких энергий было положено в 1955г., в год официального открытия обсерватории в пос. Научном. А через три года, под руководством Арнольда Арташесовича Степаняна, была создана станция космических лучей, из которой впоследствии и выросла лаборатория Гамма-астрономии. Основная задача, которая стояла перед сотрудниками станции, это было исследование космического фона элементарных частиц и адронов у поверхности Земли и в её атмосфере. Станция была оснащена двумя установками: кубическим телескопом для регистрации мезонной компоненты космических лучей и нейтронным монитором для регистрации низкоэнергичных частиц (Степанян, 1960; Степанян, Владимирский, 1960). Эти приборы работали до 1961 года и их показания посылались в Международный центр данных. Исследования показали, что магнитные бури на Земле сопровождаются понижением интенсивности космических лучей по всему энергетическому спектру. Был также установлен ряд закономерностей в распространении космических лучей, генерированных на Солнце, в межпланетном пространстве (Степанян, 1961; Владимирский, Степанян, 1961).

С 1961 по 1965 гг. на станции проводились измерения потока космических лучей в стратосфере с помощью шаров-зондов. Анализ этих данных позволил установить, что практически все вспышки выше 3-х баллов на Солнце приводят к генерации частиц высоких энергий (Степанян, 1962).

С 1965 года были начаты работы по созданию регистраторов черенковских вспышек (РЧВ) в атмосфере Земли. Дело в том, что частицы сверхвысоких энергий ($E > 10^{12}$ эВ.) врываясь в атмосферу Земли, образуют так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ), а так как в этом ливне много заряженных частиц обладает скоростями, превышающими скорость света в атмосфере, то они испускают черенковское излучение. Это излучение, согласно закону сохранения импульса, идёт в узком угле ($\sim 2^\circ$) по направлению движения первичной частицы. Это позволяет локализовать источники гамма-квантов на небесной сфере. Заряженная компонента космических лучей за счёт влияния галактических магнитных полей обладает высокой степенью изотропии. Первые оценки ожидаемых потоков гамма-квантов были сделаны в КрАО в конце 60-х годов (Владимирский, Степанян, 1970; Степанян, Павлов, 1971).

Телескоп первого поколения (РЧВ-1) был запущен в 1969 году и тогда же начались первые наблюдения с целью поиска источников гамма-квантов сверхвысоких энергий. Его общий вид представлен на рис. 1. Он представлял собой четыре светоприёмника с параболическими зеркалами и фотоумножителями в их фокальной плоскости, которые попарно были включены на совпадения по времени прихода сигналов от черенковских вспышек на фоне флуктуаций свечения ночного неба. Зеркала телескопа были смонтированы на экваториальных монтировках. Их перестановка осуществлялась вручную. Наблюдения проводились методом сканирования объекта за счёт суточного вращения Земли.



Рис.1. Гамма телескоп первого поколения в КрАО (РЧВ-1)

До 1980 г. были исследованы несколько десятков объектов различных типов: остатки сверхновых, пульсары, радиогалактики, рентгеновские источники, квазары и другие. Наиболее результативными были наблюдения пульсара CP 1133 (Степанян А.А. и др., 1971) и рентгеновского источника Суг X-3 в 1972–1980 годы. В 1972 году в гамма-диапазоне от объекта Суг X-3 была обнаружена мощная вспышка, которая достаточно хорошо по времени совпала со вспыш-

кой этого объекта в радиодиапазоне (Владимирский Б.М. и др., 1974). Были обнаружены периодические составляющие гамма-излучения от этого объекта. Показано, что гамма-излучение Суг Х-3 подвержено изменениям с различными периодами: 4,8 часа и 328 дней. Это хорошо совпало с излучением в других диапазонах (рентгеновское излучение). В 1971 году было обнаружено излучение от объекта в созвездии Кассиопея Cas γ -1 (Stepanian et al., 1972) Многолетние наблюдения галактической плоскости в различных её областях показали в среднем наличие гамма-излучения от этого протяжённого объекта (Фомин, 1977; Fomin et al., 1977) Надежность всех этих результатов была невелика от 4 до 5 σ , но в последствии они были подтверждены в других лабораториях и обсерваториях.

Начиная с 1973 года, параллельно с наблюдениями на гамма-телескопе первого поколения, сотрудники лаборатории гамма-астрономии начали разрабатывать конструкцию нового, более совершенного гамма-телескопа второго поколения, состоящего из 48 зеркал (ГТ-48). Основное отличие этого телескопа заключается в том, что он способен не только регистрировать черенковскую вспышку, но и анализировать её изображение. Это позволяет, в свою очередь, с определённой степенью вероятности разделять события (черенковские вспышки), относящиеся к гамма-квантам и фону космических лучей, которые по количеству в тысячи раз превосходят первые. По ходу строительства этого уникального сооружения постоянно проводились методические исследования, результаты которых были использованы для коррекции строительства нового телескопа (Владимирский и др., 1994). Здесь же в КрАО были отработаны новые решения по обработке и анализу наблюдательного материала. Это метод ложных источников и дифференциально позиционный метод (Fomin et al., 1994).

Основные технические параметры телескопа ГТ-48. Наземный гамма-телескоп ГТ-48 представляет собой первую в мире стереоскопическую установку, которая предназначена для регистрации черенковских вспышек, вызываемых как протонно-ядерной компонентой космических лучей, так и гамма-квантами сверхвысоких энергий (10^{12} эВ) при их попадании в атмосферу Земли.

Телескоп состоит из двух идентичных альт-азимутальных монтировок (секций), расположенных на расстоянии 20 м. одна от другой (см. рис.2). На каждой монтировке установлено по 24 зеркала диаметром 1.2 м., которые объединены в 6 малых телескопах со светоприёмными камерами. Четыре малых телескопа предназначены для регистрации излучения в видимом диапазоне, а два – для регистрации коротковолнового ультрафиолетового (200-300 нм) излучения черенковских вспышек. Светоприёмные камеры видимого диапазона телескопов состоят из 37 фотоумножителей, расположенных в фокальной плоскости телескопа и представляют гексагональную структуру (см. рис.3) Общая площадь зеркал – 54 м², поле зрения 2,6°.

Управление секциями гамма-телескопа осуществляется разработанной в лаборатории системой ведения, обеспечивающей проведение наблюдений в различных режимах (режим сканирования и режим ведения исследуемого объекта). Точность ведения за исследуемым объектом – 3 угловых минуты. Регистрация черенковских вспышек и контрольных параметров аппаратуры осуществляются с помощью разработанных в лаборатории автоматизированных систем и компьютеров.

ГТ-48 – единственная в мире установка, на которой одновременно регистрируются черенковские вспышки как в видимом (300-550 нм.), так и в ультрафиолетовом диапазоне (200-300 нм). В 2000 г. комплекс ГТ-48 признан Национальным достоянием Украины.



Рис. 2. Общий вид телескопа ГТ-48



Рис.3. Общий вид одной из 37- канальных камер телескопа

Научные результаты.

Первые наблюдения на телескопе ГТ-48 были начаты в 1989 году и ведутся по настоящее время.

- По данным наблюдений 1993–95 гг. подтверждено наличие потока гамма-квантов от объекта в созвездии Лебеда (Суг X-3) и обнаружен новый источник Суг γ -2 на уровне достоверности 7.5σ (Neshpor et al., 1995). Впоследствии наличие потока гамма-квантов от этого объекта было подтверждено в эксперименте HEGRA и в обсерватории Whipple.
- В августе 1994 года, в результате анализа данных вспыхивающей звезды EV Lac, была обнаружена вспышка в гамма-диапазоне длительностью в 1 минуту с достоверностью в 7σ (Neshpor, et al., 1995; Alekseev et al., 1995).
- Подтверждено наличие потока гамма-квантов от Крабовидной туманности. Впервые этот объект был обнаружен и исследован в обсерватории Whipple. Величины измеренных потоков для двух обсерваторий практически совпадают.
- Впервые обнаружены потоки гамма-квантов от активных галактических ядер 3C66A (Нешпор Ю.И. и др., 1998) и BL Lac (Нешпор Ю.И. и др., 2001). Показано наличие корреляции между потоком гамма-квантов и оптическим излучением для этих объектов. Это даёт основание полагать, что здесь задействованы одни и те же механизмы, в которых участвуют электроны различных энергий.
- Наблюдения в 1996–1997 годах пульсара Геминга показали существование периодической составляющей в гамма-излучении с периодом 0,237 сек.
- Результаты наблюдений активных галактических ядер Mrk421 и Mrk501 полностью совпадают с данными других экспериментов и, в частности, в обсерватории Whipple, где они впервые были обнаружены.

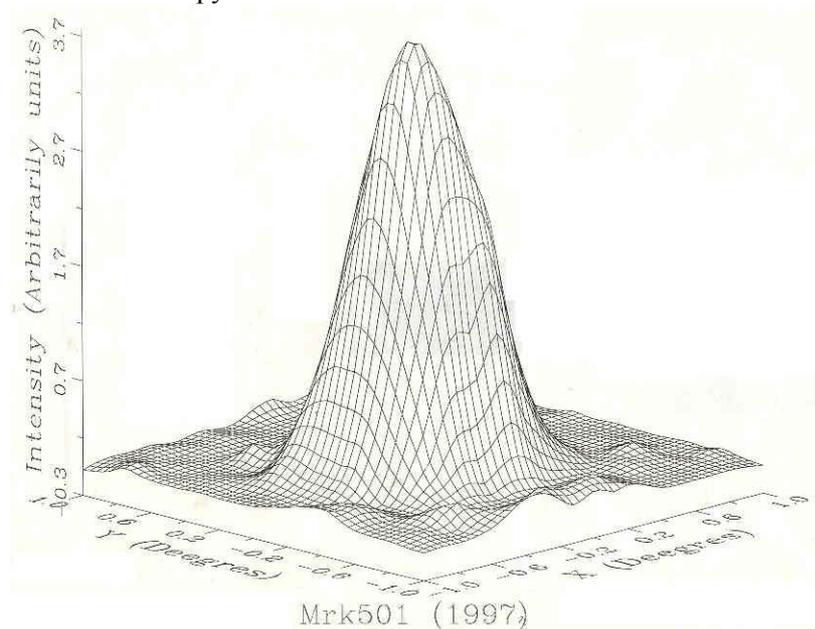


Рис.4. Трёхмерная карта положения активного галактического ядра Mrk501 (объект в центре поля зрения). Достоверность результата более 11σ .

В качестве примера результата анализа данных Mrk501 на рис. 4 показана трёхмерная карта этого объекта по данным 1997 года.

На Земле к настоящему времени работают около десятка наземных гамма-телескопов второго поколения. Обнаружено около 14 источников гамма-квантов в северном полушарии. Из них 30% впервые открыты в Крымской астрофизической обсерватории. Все новые телескопы являются стереоскопическими наподобие ГТ-48 или более развитые по сравнению с этим теле-

скопом. Основной уклон на этих телескопах второго поколения делается в сторону понижения порога регистрации, что приводит к существенному увеличению общей площади приёмных зеркал. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики этих гамма-телескопов.

Пожалуй, самым выдающимся достижением в гамма-астрономии сверхвысоких энергий было открытие потока гамма квантов от активных галактических ядер. Это – Мгк421, Мгк501, 3С66А и др. А в южном полушарии (эксперимент HESS) исследование гамма-излучения вблизи центра нашей галактики. Здесь было показано, что центр нашей галактики также является протяженным источником гамма-квантов.

Таблица 1. Сравнительная таблица параметров новых действующих и строящихся телескопов, а также телескопа ГТ-48.

Телескоп	VERITAS	HESS	MAGIC	ГТ-48
Место-положение	Аризона, США	Намибия	Канарские острова	Крым, Украина
Готовность	Первая очередь 1 из 7 секций	Первая очередь 4 из 16 секций	Первая очередь 1 из 2	100 % 2 из 2 секций
Участники	США, Англия, Ирландия, Франция	Германия	Германия, Испания, Италия, Украина, Россия, Армения	Украина
Стоимость	~ \$20 Милл.	?	~ \$8 Милл.	-
Площадь зеркал на 1 секцию	80 м ²	80 м ²	236 м ²	27 м ² *
Поле зрения	3.5°	4.0°	3.6°	2.6°
Число пикселей	499	300?	~400?	37
Угл.размер пиксела	0,12°	0,15°	~0,15°	0,4°
Энергетический порог	~50 ГэВ	~50 ГэВ	~30 ГэВ	~1 ТэВ
Энергетический Диапазон	100 ГеВ-50 ТэВ	100 ГэВ-50 ТэВ	50 ГэВ-50 ТэВ	1 ТэВ-

*На телескопе ГТ-48 в приемных камерах используются световоды, которые увеличивают эффективную площадь зеркал до 54 м².

Из сравнительной табл.1 можно видеть, какие большие усилия брошены сейчас на развитие наземной гамма-астрономии в области сверхвысоких энергий и с какой скоростью они приносят результаты.

Литература

- Владимирский Б.М., Степанян А.А. // Астрон. журн. 1961. 38. 3. 422-439.
 Владимирский Б.М., Степанян А.А.// Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. 41-42. 198-202.
 Владимирский Б.М. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. 51. 3-7.
 Владимирский Б.М. и др. // Изв. Академии Наук СССР. 1991. 55. 10. 2045.
 Владимирский Б.М. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1994. 91. 74-105.
 Нешпор Ю.И. и др. // Письма в АЖ. 1998. 24. 167-171.
 Нешпор Ю.И. и др. // АЖ. 2001. 78. 4. 291-297.
 Степанян А.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. 24. 313-319.

- Степанян А.А., Владимирский Б.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. 24. 320-329.
Степанян А.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1961. 25. 268-276.
Степанян А.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1962. 27. 178-181.
Степанян А.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. 41-42. 198-202.
Степанян А.А., Павлов И.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1971. 43. 37-41.
Степанян А.А. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1971. 43. 42-48.
Фомин В.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. 56. 35-38.
Aleseev I. Yu. Et al. // Proc. 24th ICRC. Roma. 1995. 2. 389
Fomin V.P. et al. // 15th Intern. Cosm. Ray Conf. 1977. 1. OG-4. 12-16.
Fomin V.P. et al. // Astroparticle Physics. 1994. 2(2). 137-150.
Fomin V.P. et al. // Astroparticle Physics. 1994. 2(2). 151-159.
Neshpor Yu.I. et al. // Proc. 24th ICRC. Romaю. 1995. 2. 385.
Neshpor Yu.I. et al. // Proc. 151 JAO Symp. Lecture Notes in Physics. 1995. 454. 78.
Stepanian A.A. et al. // Nature Phis. Sc. 1972. 239. 40-41.